

# KytKentäverkko M1

Jarmo Kauppinen

Opinnäytetyö

Ammattikorkeakoulututkinto



**Savonia**  
ammattikorkeakoulu



Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Elektroniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Jarmo Kauppinen	
Työn nimi KytKentäverkko M1	
Päiväys 26.10.2011	Sivumäärä/Liitteet 42/11
Ohjaaja(t) Lehtori Jorma Kekäläinen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratorio	
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa johtuvan häiriön siedon testauksessa käytettävä kytkentäverkko. Työn tilaaja oli Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratorio. EMC-laboratorio tarjoaa yrityksille sähkölaitteiden häiriön siedon testauksia ja päästömittauksia. Työssä perehdyttiin EMC-ilmiöihin, -teoriaan, -testausmenetelmiin ja niihin liittyviin standardeihin.</p> <p>Johtuvan häiriön siedon testauksissa käytetään apulaitteina kytkentäverkkoja. KytKentäverkoilla mahdollistetaan häiriösignaalin syöttäminen testissä olevalle laitteelle, tuotetaan vakaa impedanssiarvo sekä erotetaan häiriösignaalin kulku apulaitteistolle tai sähkönjakeluverkkoon. KytKentäverkon malliksi tuli M1, jonka sisällä kulkee vain suojamaajohdin. KytKentäverkon M1 taajuusalue on 150 kHz – 230 MHz.</p> <p>Työssä suunniteltiin ja rakennettiin ensiksi prototyyppi vastaamaan vaadittuja ominaisuuksia. KytKentäverkon sisälle rakennettiin vastusverkko, jonka avulla muodostetaan vaaditut impedanssiarvot. Lisäksi kotelon sisälle rakennettiin ferriittiketju, jolla estetään häiriösignaalin kulkeutuminen apulaitteistolle. KytKentäverkkojen mittauksissa käytettiin piirianalyysaattoria, jonka avulla saatiin mitattua S-parametrit eli impedanssit ja vaimennukset. Toimivan prototyypin jälkeen rakennettiin lopullinen kytkentäverkko.</p> <p>Tuloksena saatiin toimiva ja vaaditut standardiarvot täyttävä kytkentäverkko. Työssä perehdyttiin kytkentäverkkoihin laajalti, mikä mahdollistaa erilaisten kytkentäverkkojen suunnittelun ja rakentamisen myös tulevaisuudessa.</p>	
Avainsanat sähkömagneettinen yhteensopivuus, johtuvan häiriön sieto, kytkentäverkko	
julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electronic Engineering			
Author(s) Jarmo Kauppinen			
Title of Thesis Coupling and Decoupling Network M1			
Date	26 October 2011	Pages/Appendices	42/11
Supervisor(s) Mr. Jorma Kekäläinen, Lecturer			
Project/Partners Savonia University of Applied Sciences – EMC laboratory			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to design and build a coupling and decoupling network (CDN) for conducted immunity tests. The device was designed for the EMC laboratory which is part of Savonia University of Applied Sciences. The EMC laboratory offers electromagnetic immunity and electromagnetic emission tests for electrical equipment. The focus of this thesis was on EMC phenomena, theory, test sets ups and the related standards.</p> <p>Coupling and decoupling networks are used as auxiliary equipment in tests of conducted immunity. A disturbance signal to the equipment under test, a steady and permissible impedance value and decoupling of disturbance signal to the auxiliary equipment or electric distribution network are made possible by CDNs. The model of this CDN was M1 which includes only a protective earth lead. The frequency range of M1 is 150 kHz – 230 MHz.</p> <p>At first a prototype which meets all the required properties was designed and built. The common mode impedance is formed by the sum of the resistors inside the CDN. A ferrite chain which blocks the disturbing signal going to the auxiliary equipment was also made inside the CDN. S-parameters i.e. impedances and attenuations were measured by a network analyzer. The final CDN was made after there was a correctly working prototype.</p> <p>The result of this thesis was a correctly working coupling and decoupling network M1. The gained knowledge will help the building of different kinds of CDNs in the future.</p>			
<p>Keywords</p> <p>electromagnetic compatibility, conducted immunity, coupling and decoupling network</p>			
public			

## ALKUSANAT

Opinnäytetyö tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratoriolle kevättalven ja kesän 2011 aikana. Työ antoi runsaasti uutta tietoa sähkölaitteiden EMC-asioista, ja varsinkin johtuvista häiriöistä. EMC-asioihin perehtyminen on erittäin hyödyllistä elektroniikka-alalla, joten tulevaisuudessa nämä asiat ovat minulle varmasti arvokasta tietoa.

Haluan kiittää opinnäytetyöni ohjaajaa lehtori Jorma Kekäläistä. Iso kiitos neuvoista ja ratkaisuksista ongelmatilanteissa kuuluu EMC-laboratorion tekniselle vastaavalle Matti Tiusaselle, testausinsinööreille Tero Siparille ja Marko Sorsalle sekä tutkimusinsinöö-rille Mohamed Mursalille. Lisäksi haluan kiittää työkaveriani Ville Kankkusta ja avo-puolisoani Elina Jaatista kannustuksesta ja avustuksesta opinnäytetyöni aikana. Ha-luan kiittää myös perhettäni opiskeluaikana saamastani tuesta ja avusta.

Kuopiossa 26.10.2011

Jarmo Kauppinen



# SISÄLTÖ

## KÄSITTEET JA LYHENTEET

1 JOHDANTO .....	11
2 SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS (EMC).....	12
2.1 EMC-käsite.....	12
2.2 EMC-säännökset ja -valvonta .....	12
2.3 Johtuvan häiriön sieto.....	13
3 KYTKENTÄVERKKO .....	14
3.1 KytKentäverkkoihin liittyvät standardit .....	14
3.2 KytKentäverkkojen ominaisuudet .....	14
3.3 KytKentäverkkojen käyttö.....	15
3.4 Johtuvan häiriön siedon testaus .....	16
4 MITTAUKSIIN LIITTYVÄ TEORIA.....	17
4.1 S-parametrit.....	17
4.2 Impedanssi.....	19
5 KOMPONENTIT .....	20
5.1 Ferriitit .....	20
5.2 Vastukset.....	21
5.3 Johtimet, liittimet ja maadoitus.....	21
5.4 Kotelointi.....	21
6 PIIRIANALYSAATTORI .....	22
6.1 Piirianalyzaattori .....	22
6.2 Kalibrointi.....	22
6.3 Liittimet ja adapterit .....	24
7 KYTKENTÄVERKKO S1 .....	26
7.1 KytKentäverkon S1 käyttö .....	26
7.2 Piirianalyzaattorilla tehtävät mittaukset .....	26
7.2.1 Impedanssin mittaus .....	26
7.2.2 Häiriövaimennus .....	28
7.2.3 Läpimenovaimennus.....	29
7.2.4 Tulosten vertailu standardeihin ja kalibroitiraportteihin .....	30
8 ENSIMMÄINEN PROTOTYYPPI.....	31
8.1 Perehtyminen kytKentäverkkoon M1 .....	31
8.2 Kotelointi.....	31
8.2.1 Vastusten lisääminen kotelon sisälle.....	32
8.2.2 Liittimien ja johtimien paikat .....	32
8.2.3 Maadoitus .....	33
8.3 KytKentäverkon M1 prototyypin mittaukset.....	33

8.3.1 Impedanssin mittaus .....	33
8.3.2 Häiriövaimennus .....	34
8.3.3 Läpimenovaimennus.....	35
8.3.4 Tulosten vertailu standardeihin ja kalibroitiraportteihin .....	35
9 PROTOTYYPPISSÄ ILMENNEET ONGELMAT JA NIIDEN RATKAISUT .....	36
10 LOPULLISEN KYTKENTÄVERKON M1 RAKENNUS.....	37
10.1 Valitut komponentit .....	37
10.2 Kotelointi .....	37
10.3 KytKentäverkon M1 mittaukset.....	38
10.3.1 Impedanssin mittaus .....	38
10.3.2 Häiriövaimennus .....	38
10.3.3 Läpimenovaimennus.....	39
11 YHTEENVETO JA KEHITTÄMISEHDOTUKSET .....	40
LÄHTEET .....	41

## LIITTEET

- Liite 1 KytKentäverkon M1 prototyyppi
- Liite 2 Lopullinen kytKentäverkko M1
- Liite 3 Kalibroitiraportti



## KÄSITTEET JA LYHENTEET

AE	Auxiliary equipment, testauksessa käytettävä apulaite
CDN	Coupling and decoupling network, johtuvan häiriön siedon testauksissa käytettävä kytkentäverkko
EMC	Electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
EUT	Equipment under test, testattava laite
RF	Radio frequency, radiotaajuus



## 1 JOHDANTO

Työn aiheena on rakentaa johtuvan häiriön siedon mittauksessa apulaitteena käytettävä kytkentäverkko. KytKentäverkot (CDN) suunnitellaan IEC/EN 61000-4-6 ja CISPR 16 -standardivaatimuksien mukaan. Työssä perehdytään EMC-ilmiöihin, -teoriaan, -testausmenetelmiin ja niihin liittyviin standardeihin. Valmiille kytkentäverkolle tehdään vaatimustenmukaisuuden varmistamiseksi tarvittavat kalibroitimittaukset.

Työn tilaajana oli Savonia-ammattikorkeakoulun IT-kehitysyksikön EMC-laboratorio. EMC-laboratoriolla on jo käytössä erityyppisiä kytkentäverkkoja, mutta yksi puuttuvista on suojamaalle tarkoitettu kytkentäverkko. Aikaisemmin kytkentäverkot on tilattu laitevalmistajilta suoraan, koska se on ollut helpompaa ja varmempaa.

KytKentäverkon rakentamisessa tulee osata RF-tekniikkaa ja sen soveltamista sekä analogiaelektroniikkaa. Myös mekaaninen suunnittelu on osa työtä. KytKentäverkon kotelo tulee valmistaa itse tai löytää vaatimukset täyttävä valmis kotelo.

## 2 SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS (EMC)

### 2.1 EMC-käsite

Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC, Electromagnetic Compatibility) voidaan kuvata laitteen toimivuutena hyväksyttävästi sen käyttöympäristössä tuottamatta liian suuria sähkömagneettisia häiriöitä ympäristöönsä. Tämän lisäksi sen on siedettävä muualta tulevia sähkömagneettisia häiriöitä. Hyvä EMC-suojaus edellyttää, että laite suunnitellaan, rakennetaan ja testataan sen tuleva käyttöympäristö huomioon ottaen. Tämä tarkoittaa sitä, että on tiedettävä, minkälaiset sähkömagneettiset kentät laitteen ympärillä tulee olemaan. Vaikka sähkömagneettisuus yleensä viittaa korkeataajuuksisiin ilmiöihin, määrittää se EMC-käsitteessä kaikki taajuusalueet ja kytkeytymistiet. (Williams 2001, 14.)

### 2.2 EMC-säännökset ja -valvonta

Laitevalmistajalta vaaditaan vaatimustenmukaisuusvakuutusta ja dokumentaatiota siitä, että kaikki vaadittavat suojaus- ja turvallisuusmääräykset ovat EMC-direktiivin mukaan hyväksytyjä. EMC-direktiivi edellyttää, että kaikki sähköiset laitteet ovat yhteensopivia muiden sähköisten laitteiden kanssa. Laitteen täyttäessä vaatimukset EMC-testien jälkeen se saa CE-merkkihyväksynnän EMC-direktiivin mukaan Euroopan unionin alueella. (Williams 2001, 28 – 29.) Valmistajan täytyy säilyttää tuotteen vaatimustenmukaisuuden osoittamat asiakirjat kymmenen vuoden ajan laitteen tultua markkinoille (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/108/EY, L 390/32).



KUVA 1. EMC-direktiivin mukainen CE-merkintä (Tukes 2011.)

### 2.3 Johtuvan häiriön sieto

Johtuvan häiriön sieto radiotaajuuksilla (RF, Radio Frequency) viittaa laitteeseen tulevien ei-haluttujen RF-jännitteiden ja -virtojen tuloihin ulkoisten johtojen ja kaapeleiden kautta. Sähköinen toiminta radiotaajuuksilla laitteen osissa aiheuttaa ns. RF-kohinaa ulkoisiin kaapeleihin. Tällaisiin laitteisiin kytketyt muut laitteet joutuvat johtuvien sähkömagneettisten häiriöiden kohteeksi. Tämä kohina voi olla differentiaalimuotoista (DM) tai yhteismuotoista (CM). (Armstrong, 6.)

Sähköinen toiminta radiotaajuuksilla aiheuttaa laitteessa myös sädemäisiä sähkömagneettisia kenttiä. Sähkökentille alttiit johdot ja kaapelit ovat johtimia RF-virroille ja -jännitteille. Kaikentyypiset sähköiset laitteet vuotavat kyseisiä sähkökenttiä, joko tahattomasti tai ollessaan radiolähettäjiä. (Armstrong, 6.)

Radiot, televisiot, tutkalähettimet ja tehokkaat teollisuus- sekä sairaalalaitteet, jotka käyttävät RF-energiaa toimiakseen suunnitellusti, voivat päästää erittäin tehokkaita jännitteitä ja virtoja kytkettyihin johtoihin ja kaapeleihin. Ne voivat myös lähettää todella voimakkaita sähkökenttiä ilmaan niillä taajuuksilla, joilla ne on suunniteltu toimimaan. (Armstrong, 6.)

### 3 KYTKENTÄVERKKO

KytKentäverkko-nimitys tulee englanninkielisistä sanoista coupling and decoupling network (CDN). Suoraa suomennosta tälle termille ei ole, mutta yleisesti puhutaan kytKentäverkosta. KytKentäverkkoja käytetään testien uusittavuuden takia, mutta myös suojaamaan testauksessa käytettäviä apulaitteistoja (AE, Auxiliary Equipment). KytKentäverkon osat voidaan yhdistää yhdeksi kokonaisuudeksi, tai ne voi myös koostua eri osista, häiriösignaalin erottamisesta tai syöttämisestä (IEC 61000-4-6 2008, 12). Jokaiselle testattavalle laitteelle tulee käyttää sille tarkoitettua kytKentäverkkoa. Käytettävä kytKentäverkko määräytyy testattavan laitteen (EUT, Equipment Under Test) ominaisuuksista ja kaapeloinnista. KytKentäverkon tulee mahdollistaa häiriösignaalin syöttäminen testattavalle laitteelle, vakaa impedanssiarvo, häiriösignaalin erottaminen apulaitteistosta ja halutun signaalin läpäisy.

#### 3.1 KytKentäverkkoihin liittyvät standardit

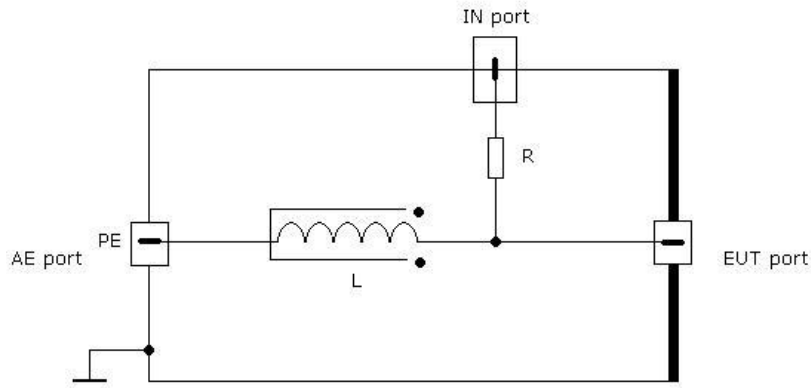
Standardi IEC/EN 61000-4-6 määrittelee radiotaajuusalueella aiheutuvien johtuvien häiriöiden immunitetin testaus- ja mittaustekniikat.

Standardi CISPR 16-1-2 määrittelee johtuvien radiotaajuisten häiriöiden ja immunitetin mittalaitteistot, apulaitteistot ja menetelmät.

#### 3.2 KytKentäverkkojen ominaisuudet

KytKentäverkkoja käytetään yleensä taajuusalueella 150 kHz – 80 MHz, mutta tietyissä laitetesteissä vaaditaan taajuusalue 230 MHz:iin asti (IEC 61000-4-6 2008, 38). Kaikki Savonian EMC-laboratorion kytKentäverkot on suunniteltu 230 MHz:iin asti, joten myös kytKentäverkko M1 mitoitetaan taajuusalueelle 150 kHz – 230 MHz.

Suojaamattomille tehonsyöttölinjoille käytetään M-tyyppin kytKentäverkkoja. M1-tyyppin kytKentäverkossa on suojamaajohdin (PE), kun taas M2-tyyppin kytKentäverkossa on kaksi johdinta, vaihe (L) ja nolla (N). M3-tyyppin kytKentäverkossa ovat nämä kaikki kolme linjaa N, L ja PE. M4- ja M5-tyyppin kytKentäverkot ovat eri variaatioita näistä linjoista, ja niissä mukana ovat myös vaiheet L2 ja L3.



KUVA 2. Kytcentäverkon M1 kytcentäkaavio

Suojaamattomille symmetrisille signaalilinjoille käytetään T-tyyppin kytcentäverkkoja. Suojatuille signaalilinjoille käytetään S-tyyppin kytcentäverkkoja. S- ja T-tyyppin kytcentäverkoilla on monia erilaisia liitävaihtoehtoja, kuten esimerkiksi USB, Ethernet ja sarjaportti. AF-tyyppin kytcentäverkot on tarkoitettu epäsymmetrisille suojaamattomille linjoille.

### 3.3 Kytcentäverkkojen käyttö

Johtuvan häiriön sietotestin tarkoituksena on aktivoida sähkö- ja magneettihäiriökentät testattavassa laitteessa. Testissä sovelletaan yhteismuotoisen häiriön kulkua, jossa verrataan maadoituslevyn ja tiettyjen kaapeleiden suhdetta. Häiriö on määritetty lähdön  $150\ \Omega$ :iin, joka on myös impedanssiarvo kaikilla kaapeleilla, jotka ovat kytkettyinä testattavaan laitteeseen. Testeissä on siis käytettävä kytcentäverkkoja, joiden avulla saadaan impedanssi vakiinnutettua tai erotettua. Kytcentäverkoilla varmistetaan, että ei-toivotut muutokset eivät vaikuta testiin ja että testauslaitteiston sijoittelu on kontrolloitua ja mahdolliset hajakytkennät minimoitu. (Marshall 2005, 1.)

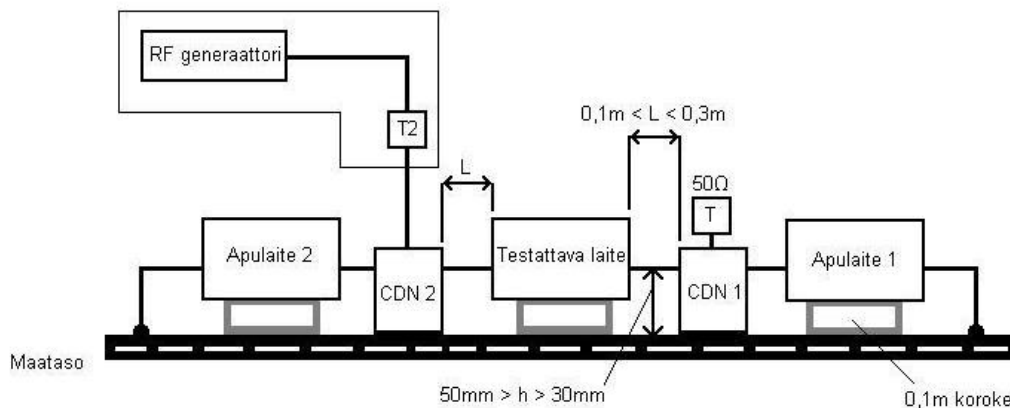
TAULUKKO 1. Yhteismuotoinen impedanssi (IEC 61000-4-6 2008, 38.)

	Taajuusalue		
Parametri	0,15 MHz - 26 MHz	26 - 80 MHz	80 - 230 MHz
$ Z_{ce} $	$150\ \Omega \pm 20\ \Omega$	$150\ \Omega + 60\ \Omega - 45\ \Omega$	$150\ \Omega + 60\ \Omega - 60\ \Omega$

Taulukossa 1 on määritelty IEC 61000-4-6 standardin mukaiset yhteismuotoiset impedanssitasot eri taajuuksilla. Matalilla taajuuksilla impedanssin vaihtelevuusraja on pienempi verrattaessa korkeimpiin taajuuksiin.

Kaikissa testitilanteissa vaaditaan vain kaksi  $150\ \Omega$ :n kytkentäverkkoa. Kytkentäverkkoa, jota käytetään testisignaalin lähettämiseen, voidaan siirtää testissä käytettävien porttien mukaan. Kun kytkentäverkko poistetaan portista, voidaan sitä käyttää signaalin erottamiseen. Yksi kytkentäverkko tulee yhdistää porttiin, jota testataan, ja yksi kytkentäverkko tulee yhdistää toiseen porttiin  $50\ \Omega$ :n päätteellä. Signaalin erotusmuodossa tulee kytkentäverkot laittaa kaikkiin portteihin joihin on liitetty kaapelit. Tällä tavalla käytössä on jokaisessa päässä vain yksi päätetty  $150\ \Omega$ :n silmukka. Jos testattavassa laitteessa on vain yksi portti, kytketään se kytkentäverkkoon häiriön syöttämiseen. (IEC 61000-4-6 2008, 18.)

### 3.4 Johtuvan häiriön siedon testaus



KUVA 3. Johtuvan häiriön siedon testiasetus

Kuvassa 3 on esitetty johtuvan häiriön siedon testiasetus. Testigeneraattorilta syötetään häiriösignaali 6 dB:n vaimentimen T2 läpi. Häiriösignaali kulkee CDN 2:n läpi testattavalle laitteelle. CDN 2 erottaa häiriösignaalin kulun apulaite 2:lle. Testattavalta laitteelta häiriösignaali kulkee CDN 1:lle, joka on päätetty  $50\ \Omega$ :n päätteellä T, jolla muodostetaan vaadittu  $150\ \Omega$ :n impedanssitaso. CDN 1 erottaa häiriösignaalin kulun apulaite 1:lle, joka voi olla esimerkiksi yleismittari, jolla seurataan jännitetasen muutoksia.



## 4 MITTAUKSIIN LIITTYVÄ TEORIA

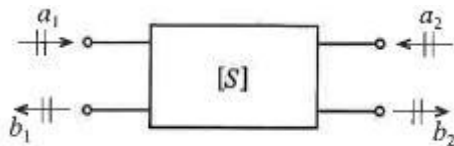
### 4.1 S-parametrit

Monimutkaiset kytkentäverkot voidaan esittää yksinkertaisena tulojen ja lähtöjen välisenä riippuvuutena ilman, että tunnettaisiin verkon sisärakennetta. Menetelmä on erittäin hyödyllinen RF-tekniikassa. Yksi esitystapa on sirontaparametrit (scattering-parameter) eli ns. S-parametrit. Niiden tärkeä merkitys johtuu siitä, että todellisia järjestelmiä ei voida kuvata yksinkertaisten avoimen tai oikosuljetun piirin mittausten avulla. S-parametrien avulla voidaan kuvata kaksiporttiverkot ilman terminaaliehtoja. (Ludwig & Bretchko 2000, 143, 168.)

S-parametrit ovat tehoaaltokuvauksia, joilla määritellään verkon tulon ja lähdön välinen riippuvuus tulevan ja heijastuneen tehoaallon avulla. Tulevan normalisoidun tehoaallon  $a_n$  ja heijastuneen normalisoidun tehoaallon  $b_n$  määritelmät näkyvät kaavoissa 4.1 ja 4.2, missä alaindeksi  $n$  kuvaa porttinumeroa. Impedanssi  $Z_0$  on kytkentälinjojen ominaisimpedanssi kytkentäverkon sisäänmenon ja ulostulon puolelta. (Ludwig, & Bretchko 2000, 168.)

$$a_n = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(V_n + Z_0 I_n) \quad (4.1)$$

$$b_n = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(V_n - Z_0 I_n) \quad (4.2)$$



KUVA 4. Yleisesti kuvatut kaksiporttiverkon S-parametrit (Ludwig & Bretchko 2000, 169.)

Kaavoista 4.1 ja 4.2 johdetut jännitteen ja virran yhtälöt:

$$V_n = \sqrt{Z_0}(a_n + b_n) \quad (4.3)$$

$$I_n = \frac{1}{\sqrt{Z_0}}(a_n - b_n) \quad (4.4)$$

Teho saadaan laskettua kaavasta 4.5.

$$P_n = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{V_n I_n^*\} = \frac{1}{2} (|a_n|^2 - |b_n|^2) \quad (4.5)$$

Jännitteiden ja virtojen avulla voidaan myös lausua aaltokomponentit:

$$a_n = \frac{V_n^+}{\sqrt{Z_0}} = \sqrt{Z_0} I_n^+ \quad (4.6)$$

$$b_n = \frac{V_n^-}{\sqrt{Z_0}} = -\sqrt{Z_0} I_n^- \quad (4.7)$$

Näin ollen aaltokomponenteista 4.6 ja 4.7, sekä yhtälöistä 4.3 ja 4.4 voidaan johtaa seuraava yhtälö:

$$V_n = V_n^+ + V_n^- = Z_0 I_n^+ - Z_0 I_n^- \quad (4.8)$$

Perustuen yleisesti kuvatun kaksiporittiverkon kaavioon (Kuva 4), voidaan S-parametrit määritellä seuraavasti:

$$\begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} \quad (4.9)$$

Matriisin sisälle tulevat  $S_n$ -parametrit määritellään seuraavasti:

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \equiv \frac{\text{heijastunut tehoaalto portissa 1}}{\text{tuleva tehoaalto portissa 1}} \quad (4.10)$$

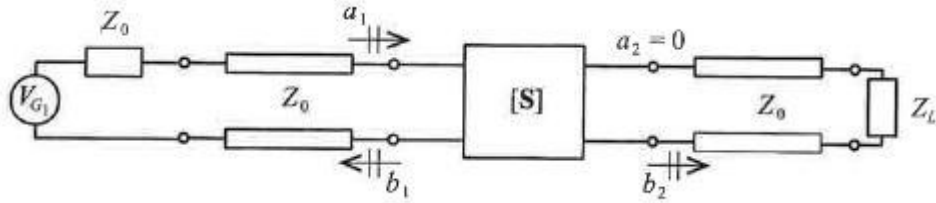
$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \equiv \frac{\text{lähtevä tehoaalto portissa 2}}{\text{tuleva tehoaalto portissa 1}} \quad (4.11)$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \equiv \frac{\text{heijastunut tehoaalto portissa 2}}{\text{tuleva tehoaalto portissa 2}} \quad (4.12)$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \equiv \frac{\text{lähtevä tehoaalto portissa 1}}{\text{tuleva tehoaalto portissa 2}} \quad (4.13)$$

## 4.2 Impedanssi

S-parametrit voidaan määrittää vain kun tulo ja lähtö ovat tarkasti sovitettuja. Esimerkiksi  $S_{11}$  ja  $S_{21}$  määrittämisessä on varmistettava, että ulostulopuolen linjaimpedanssi on sovitettu  $Z_L = Z_0$ , jotta  $a_2 = 0$ . (Ludwig & Bretchko 2000, 171.)



KUVA 5.  $S_{11}$  ja  $S_{21}$  mittaus sovitamalla portissa 2 oleva linjaimpedanssi  $Z_0$  vastamaan kuormaimpedanssia  $Z_L = Z_0$  (Ludwig & Bretchko 2000, 171.)

Asetelma mahdollistaa  $S_{11}$  laskemisen ratkaisemalla sisäänmenon heijastuskerroin:

$$S_{11} = \Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (4.14)$$

Lisäksi ottamalla logaritmi parametrissa  $S_{11}$  saadaan heijastusvaimennus desibeleinä:

$$-20 \log |S_{11}| \text{ dB} \quad (4.15)$$

Lisäksi, kun portti 2 on asianmukaisesti päätetty, saadaan  $S_{21}$  kaavaksi seuraava:

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} = \left. \frac{V_2^- / \sqrt{Z_0}}{(V_1 + Z_0 I_1) / (2\sqrt{Z_0})} \right|_{I_2^+ = V_2^+ = 0} \quad (4.16)$$

Koska  $a_2 = 0$ , voidaan portissa kaksi kulkevat jännite- ja virta-aallot asettaa nolaksi,  $V_2^+ = I_2^+ = 0$ . Korvaamalla jännite  $V_1$  generaattorin jännitteellä  $V_{G1}$  ja vähentämällä lähdeimpedanssista  $Z_0$  jännitehäviö eli  $V_{G1} - Z_0 I_1$  saadaan:

$$S_{21} = \frac{2V_2^-}{V_{G1}} = \frac{2V_2}{V_{G1}} \quad (4.17)$$

(Ludwig & Bretchko 2000, 171 – 172)

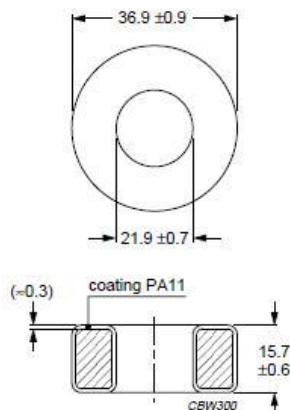
## 5 KOMPONENTIT

### 5.1 Ferriitit

Ferriittejä käytetään estämään eri lähteistä tulevien johtuvien häiriöiden etenemistä. Ferriitti on yleisnimitys keraamisille materiaaleille, jotka sisältävät jonkin rautaoksidin kombinaation ja yhden tai useampia kahdenarvoisia siirtymämetalleja. Ferriittien magnetoitumiskäyrät ja häviöominaisuudet ovat riippuvaisia käytetyistä metalliyhdisteistä. Ferriittien resistiivisyydessä on myös vaihteluita. Yleinen ferriiteissä käytetty metalliyhdiste on nikkeli ja sinkki (NiZn). Nikkeli-sinkki-ferriittien resistiivisyys on luokkaa  $10^4 - 10^6$  ohmm. (Reitmaa & Gustafsson 1996, 145 – 147.)

Ferriittejä käytetään yleensä heijastelevina alipäästösuodattimina. Maksimivaimennuksillaan ferriiteillä on epäsovitus sekä häiriölähteeseen ja suojattavaan laitteeseen että siirtolinjaan nähden. Suodatuskäytössä ferriitin avulla saadaan suurehko sarjaimpendanssi, jolla vaimennetaan suurtaajuisia häiriöitä. Pienitaajuisille signaalikomponenteille ferriitti edustaa pientä sarjaimpendanssia. Oikein mitoitettuna ferriiteillä pystytään parantamaan huomattavasti elektroniikan häiriösietoisuutta. Niillä voidaan myös vähentää häiriöiden emissiota vaikuttamatta ollenkaan kytkennän normaaliin toimintaan. (Reitmaa & Gustafsson 1996, 145, 148 – 149.)

Tässä työssä käytettiin Ferroxcuben 4C65-mallin nikkeli-sinkki-yhdistelmän ferriittejä. Niitä käytetään pääasiallisesti pulssi-, laajakaista- ja symmetrintiimuuntajiin sekä kuristimiin. Lisäksi lopulliseen kytkentäverkkoon käytettiin myös Würthin 7 W 380-mallin nikkeli-sinkki-yhdistelmän ferriittejä, jotka sopivat laajalle taajuusalueelle.



KUVA 6. Kytkentäverkossa M1 käytetyn Ferroxcube 4C65-mallisen ferriitin mitat (Ferroxcube, 2.)

## 5.2 Vastukset

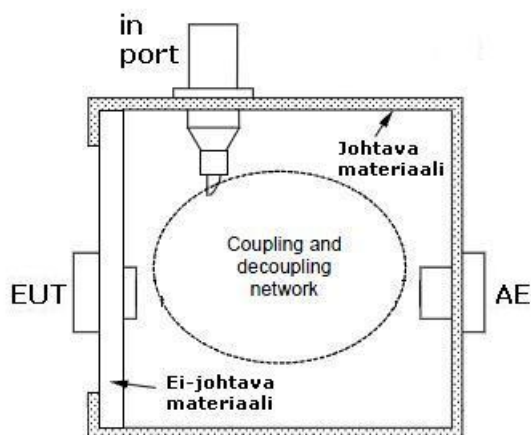
Kytkentäverkossa olevia vastuksia tarvitaan muodostamaan yhteismuotoinen  $150\ \Omega$ :n impedanssi. Se muodostuu kytkentäverkon RF-portin  $50\ \Omega$ :n päätevastuksesta ja kytkentäverkon sisällä olevasta vastusverkosta. Vastusverkossa on rinnan kaksi  $220\ \Omega$ :n vastusta, jotka ovat sarjassa  $10\ \Omega$ :n vastuksen kanssa. Vastusverkolla saadaan tehonkestoa parannettua, koska tehot jakautuvat kaikkiin vastuksiin. Tehonkestoon kiinnitetään huomiota myös komponenttien hankinnassa. Vastuksilla on erilaisia keskimääräisiä tehonkestoja, joten kytkentäverkoissa käytetään vastuksia, joilla on hyvät tehonkesto-ominaisuudet.

## 5.3 Johtimet, liittimet ja maadoitus

Kytkentäverkossa käytetään johtimena ohuesti eristettyä käämilankaa, joka on halkaisijaltaan  $1,8\ \text{mm}$ . Liittiminä apulaitteiston ja testattavan laitteen puolella on banaaniliittimet. Maadoitus tapahtuu ohuen maadoitusjohtimen avulla.

## 5.4 Kotelointi

Kotelolta vaaditaan hyviä johtavia ominaisuuksia. Se luo maadoitusalueen kanssa tarvittavat impedanssitasot. Kotelointi on kauttaaltaan metallia, mutta testattavan laitteen puolen on oltava ei-johtavaa materiaalia. Tällä tavoin testattavan laitteen puolen signaali ei kulkeudu muuta kuin liittimen kautta.



KUVA 7. Koteloinnin vaatimukset (muokattu IEC 61000-4-6 2008, 28)

## 6 PIIRIANALYSAATTORI

### 6.1 Piirianalyssaattori

Piirianalyssaattorilla mitataan suurtaajuuspiirien S-parametrejä, joiden mittaus tapahtuu sinimuotoisella signaalilla. Yleisin käyttötarkoitus on piensignaali-S-parametrien mittaus, jolloin signaalitaso pidetään hyvin alhaisena. Tällä tavalla tarkasteltava piiri toimii lineaarisesti eli säröttömästi. S-parametrit ovat signaalitasosta riippumattomia lineaarisessa piirissä, mutta varsinkin aktiiviset piirit alkavat toimia epälineaarisesti suurilla signaalitasoilla. Toisaalta hyvin pienet signaalitasot voivat kohinan vuoksi vääristää mittaustuloksia. Piirianalyssaattorista voidaan valita haluttu määrä taajuuspisteitä, joissa mittaus tapahtuu jokaisella taajuuspisteellä erikseen. Mittaustuloksista on nähtävissä mm. vahvistus, vaimennus, vaihe-ero sekä tulo- ja lähtöimpedanssi eli sovitus. (Silvonon 2009, 3.)



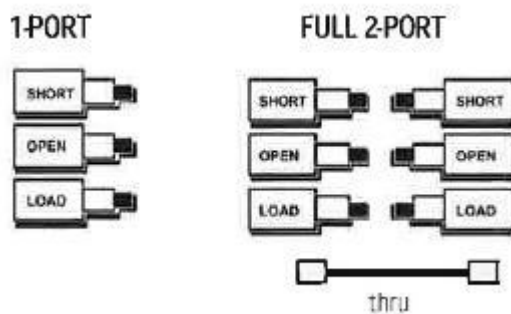
KUVA 8. Rohde & Schwarz'in piirianalyssaattori

### 6.2 Kalibrointi

Suurtaajuusalueen mittalaitteet täytyy aina kalibroida ennen mittauksia, koska ne ovat käytännössä epätarkkoja ja epästabiileja. Jos laitetta ei kalibroida, voi mittauksissa tulla virheellisiä tuloksia. Virheiden syntyyn vaikuttavat signaalin virhevuodot,

heijastukset sekä taajuusvaihtuvuudet. Mittauksiin liittyen tehdään joko 1- tai 2-porttikalibrointi. (Agilent Technologies 2005, 1:48.)

Piirianalysointin kalibrointi perustuu lohkokaaviotasoiin virhemalleihin. Eniten käytetty virhemalli on 12-terminen, jossa jokainen 12 parametrilla on esitetty kompleksisena sirontaparametrina jokaisella mittaustaajuudella erikseen. Yleisenä kalibrointimenetelmänä on käytetty nk. SOLT-menetelmää, joka myös tunnetaan TOSM-menetelmänä. TOSM tulee sanoista Thru, Open, Short ja Match. Nämä neljä ovat passiivisia peruskomponentteja, joilla on tarkasti tunnetut fysikaaliset ominaisuudet. (Silvonen 2009, 13, 31.)



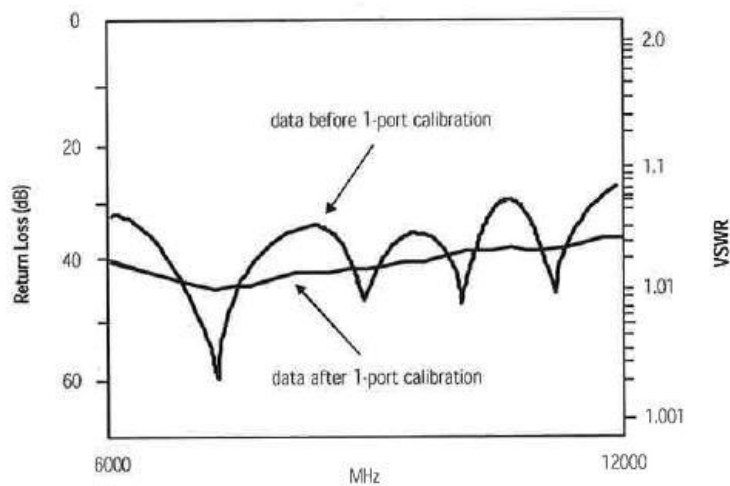
KUVA 9. 1- ja 2-porttikalibroinnin passiiviset peruskomponentit (Agilent Technologies 2005, 1:61.)

Short tarkoittaa oikosulkua, jonka heijastuskerroin yleensä tunnetaan eri taajuuksilla, vaikka se ei välttämättä olisi vakio. Hyvän oikosulun heijastuskertoimen itseisarvo on yksi. Kaapelin aiheuttama kulma voi muuttua taajuuden mukana, mutta tämä on sallittua. Open tarkoittaa avointa päätettä, mutta on ominaisuuksiltaan short'in kaltainen. Avoin pääte on yleensä säteilyhäviöiden ja kaapelin avoimessa päässä vääristyvän kenttäkuvan vuoksi epäideaalinen. Match tarkoittaa T-standardin kanssa käytettävää sovitettua päätettä. Thru (through) tarkoittaa suoraa läpimenoa tai lyhyttä siirtojohtoa. (Silvonen 2009, 31 – 32.)



KUVA 10. Rohde & Schwarz:in kalibroitinpäätteet

Yksiporttikalibroinnit tehdään heijastusmittauksia ( $S_{11}$ ) varten. 1-porttikalibroinnilla saadaan lähdön virheet sekä suuntaavuus- ja heijastusvirheet eliminoitua. 2-porttikalibroinnilla saadaan mittaustuloksista poistettua lähdön virheiden sekä suuntaavuus- ja heijastusvirheiden lisäksi kuorman, vaihdekulman ja ylikuulumisen virheet. 2-porttikalibroinnilla saadaan erittäin tarkka mittatarkkuus kaikkiin mittauksiin. (Agilent Technologies 2005, 1:61.)



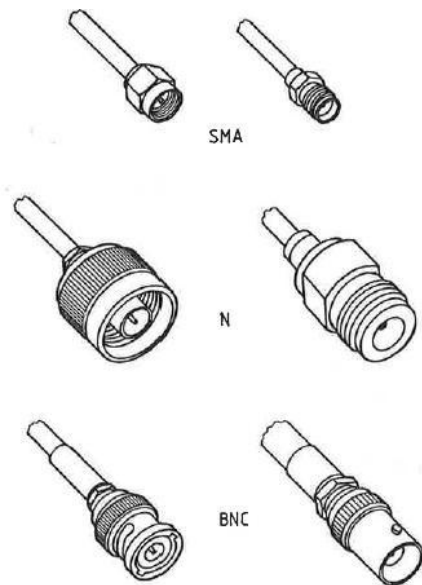
KUVA 11. Heijastusvaimennus ennen ja jälkeen 1-porttikalibroinnin (Agilent Technologies 2005, 1:58.)

### 6.3 Liittimet ja adapterit

Piirianalysointorilla mitatessa käytetään useita erilaisia koaksiaalisia liittimiä. Yleisimpiä liittintyyppäjä ovat SMA, N ja BNC. Mikroaaltomittauksissa käytetään SMA- ja N-



liittimiä, kun taas matalataajuuksilla BNC-liittimiä. Liitettävät komponentit ovat usein erityyppisiä tai samaa sukupuolta olevia, joten tarvitaan monenlaisia adaptereita. Tässä työssä tehtiin erilaisia adaptereita liittyen eri mittauksiin. Adaptereilla tulee olla hyvä impedanssisovitus ja on ensisijaisen tärkeää, että kaikki testit ovat toistettavissa. Mittaustulokset täytyy olla joka kerta samat, eivätkä ne saa muuttua jos esimerkiksi niiden asentoa vaihtaa. (Lehto & Räisänen 2007, 47 - 48)



KUVA 12. SMA-, N- ja BNC-liittimiä (Lehto & Räisänen 2007, 47.)

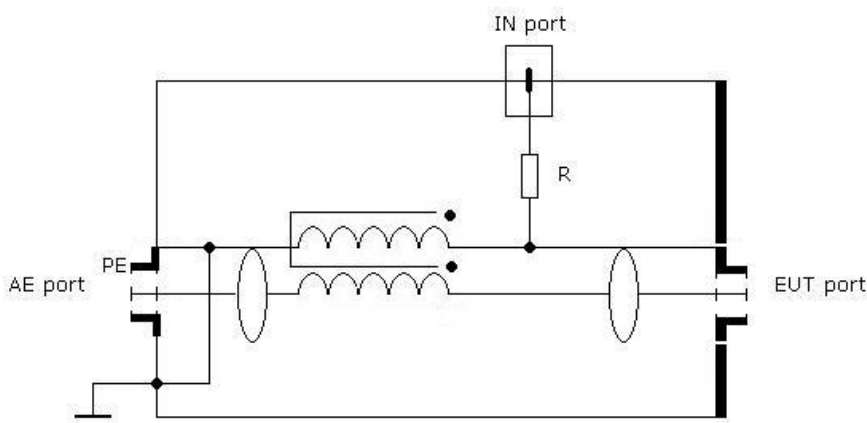
Testattaessa vertailupohjana käytettävää kytkentäverkkoa S1, täytyy mittauksien avuksi tehdä adapteri, joka vaihtaa signaalin kulun keskijohdosta johdon liittimen runkoon, koska kytkennän sisällä on käytetty suojattua kaapelia. Tämä johtuu siitä, että kytkentäverkon molemmiin puolin olevat BNC-liittimet johtavat signaalia runkonsa kautta. Piirianalyssaattorissa käytetään suojattua koaksiaalikaapelia. Samantyyllisiä adaptereita käytetään myös rakennettavan kytkentäverkon M1 mittauksissa. Piirianalyssaattorilta tuleva koaksiaalikaapeli vaihdetaan adapterilla banaaniliittimeksi, jota käytetään kyseisessä kytkentäverkossa M1.

## 7 KYTKENTÄVERKKO S1

KytKentäverkko S1 vastaa kytkennältään hyvin paljon rakennettavaa kytKentäverkko M1:tä, joten se sopi erittäin hyvin vertailupohjaksi.

### 7.1 KytKentäverkon S1 käyttö

KytKentäverkko S1 on tarkoitettu suojatuille kaapeleille kuten koaksiaalikaapeleille. Erot kytKentäverkkojen S1 ja M1 välillä ovat liittimissä. S1:n EUT- ja AE-puolella on BNC-signaaliliittimet, kun taas M1:ssä on banaaniliittimet. Lisäksi S1:ssä häiriösignaali kytkeytyy EUT-puolen liittimen runkoon kun taas M1:ssä se menee banaaniliittimen yhteen ainoaan liitinpisteeseen. KytKentäverkko S1:ssä johdin on koaksiaalinen, joten signaali kulkee keskijohdossa sekä ulkoisessa metallivaipassa.



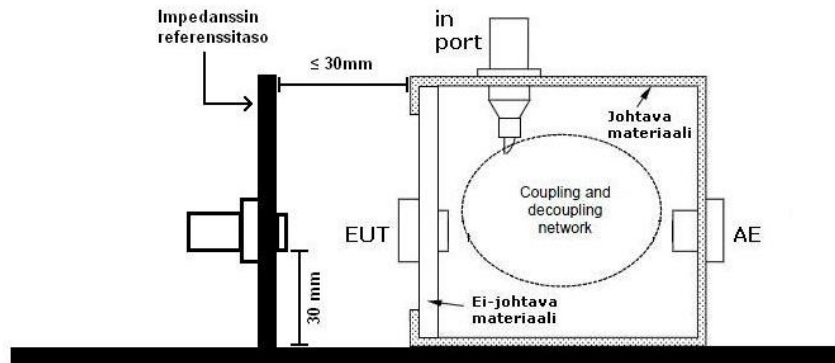
KUVA 13. KytKentäverkon S1 kytkentäkaavio (muokattu IEC 61000-4-6 2008, 42.)

### 7.2 Piirianalysaattorilla tehtävät mittaukset

#### 7.2.1 Impedanssin mitta

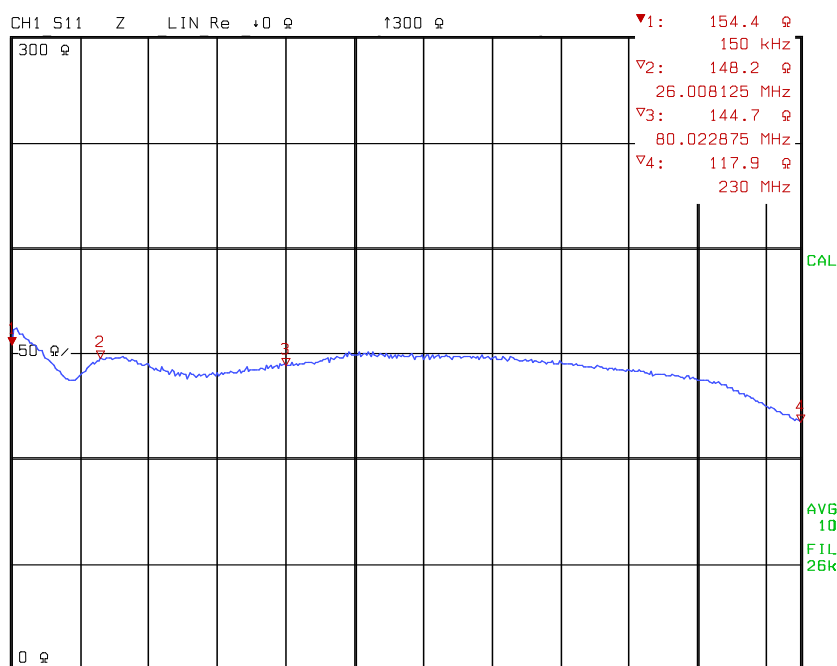
KytKentäverkkojen impedanssi mitataan RF-portin ja EUT-portin välistä. Piirianalysaattorin ykkösportin johdin kytketään mittauksessa tarvittavaan impedanssin referenssitason BNC-liittimellä. Impedanssin referenssitaso on maadoitusalueen päällä. BNC-liittimen juotosliityntään on kiinnitetty banaanijohdin, joka kytketään impedanssimittauksessa kytKentäverkon EUT-porttiin. KytKentäverkon RF-portti on päätetty 50

$\Omega$ :n päätteellä. Tällä tavoin kytkentäverkolle saadaan vaadittu 150  $\Omega$ :n impedanssi. Kuvassa 14 on kuvattu yhteismuotoisen impedanssin mittausasetelma.



KUVA 14. Yhteismuotoisen impedanssin mittausasetelma (muokattu IEC 61000-4-6 2008, 28.)

Kuvassa 15 on piirianalysaattorilta saatu impedanssilaskelma taajuusalueella 150 kHz – 230 MHz. Kuvan oikeassa yläkulmassa näkyvät neljä eri taajuuspistemerkintää ovat taulukossa 1 näkyvät impedanssiarvoalueen muutoskohdat. Horisontaaliakseli näyttää impedanssiarvot 50  $\Omega$ :n välein. Vertikaaliakseli näyttää taajuuden 20 MHz:n välein. Kuvasta voidaan siis päätellä, että kytkentäverkon S1 impedanssiarvot ovat vaadittujen arvojen sisällä.



KUVA 15. KytKentäverkon S1 impedanssiarvot

### 7.2.2 Häiriövaimennus

KytKentäverkkojen häiriövaimennus mitataan RF-portin ja EUT-portin välistä desibeleinä. Desibeliarvot kuvaavat näiden kahden portin välistä tehoaallonmuutosta. Piirianalysaattorin ykkösportti kytketään RF-porttiin BNC-liitännällä. Kakkosportti kytketään 100  $\Omega$ :n vastusadapterin kautta kytKentäverkon EUT-porttiin. 100  $\Omega$ :n vastusadapterilla sovitetaan lähtö- ja tulopuolen impedanssit samanlaisiksi. Vastusadapteri on kosketuksessa maadoitusalueeseen.

Häiriövaimennus ja yhteismuotoinen impedanssi ovat yhteydessä toisiinsa. KytKentäverkon sisällä olevat ferriitit vaikuttavat impedanssiin. Lisättäessä johtimen kierroslukumääriä ferriittien ympärillä impedanssiarvot nousevat matalilla taajuuksilla. Mentaessā korkeammille taajuuksille impedanssiarvo alkaa laskea. Sama tilanne tapahtuu häiriövaimennusta mitattaessa.

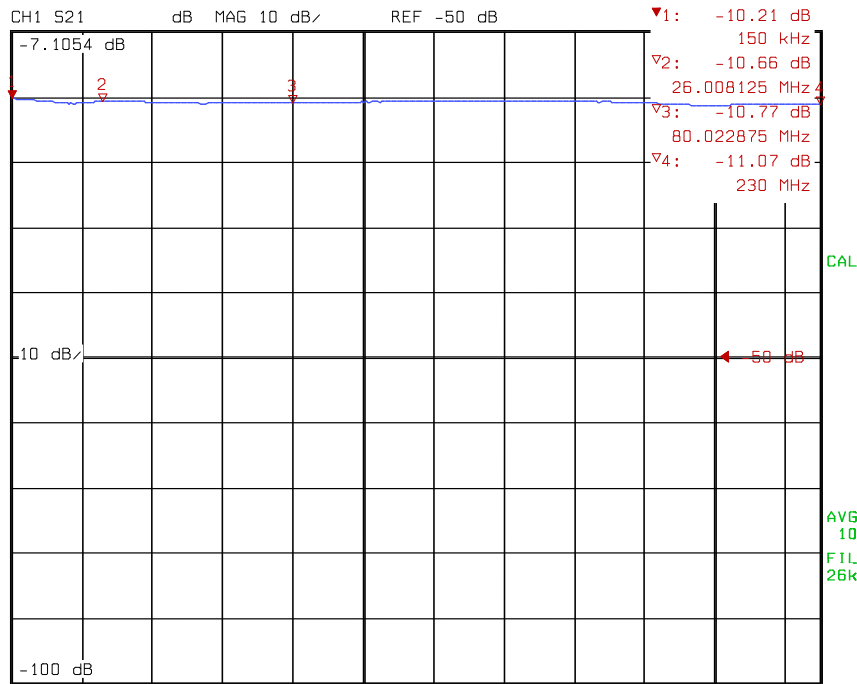
Vastusarvoilla laskettu häiriövaimennus saadaan kaavasta

$$A = 20 * \log \frac{Z_A + Z_F + Z_B + Z_R}{Z_A + Z_B} \quad (7.1)$$

jossa  $Z_A$  on lähdeimpedanssi (50  $\Omega$ ),  $Z_F$  on vastusverkon impedanssi (120  $\Omega$ ),  $Z_B$  on kuormaimpedanssi (50  $\Omega$ ) ja  $Z_R$  on vastusadapterin impedanssi (100  $\Omega$ ).

Laskukaavalla 7.1 saatu häiriövaimennus  $A \approx 10,10 \text{ dB}$  tapahtuu vain matalilla taajuuksilla. Korkeammille taajuuksille siirryttäessä häiriövaimennus hieman kohoaa.

Kuvassa 16 horisontaaliakselilla näkyy häiriövaimennus 10 dB:n välein. Vertikaaliakselilla näkyy taajuusalue 150 kHz – 230 MHz.

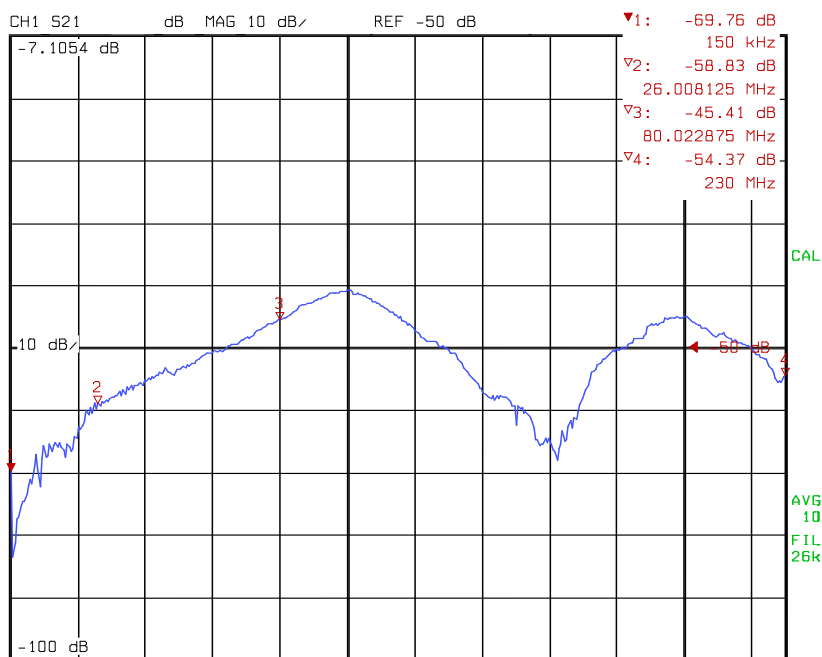


KUVA 16. KytKentäverkon S1 häiriövaimennusarvot

### 7.2.3 Läpimenovaimennus

Läpimenovaimennus mitataan EUT-portin ja AE-portin välistä. Läpimenovaimennuksen tarkoituksena on suodattaa syötetty häiriösignaali menemästä testauksissa tarvittaville apulaitteille. Mittaus tapahtuu kytkemällä piirianalysaattorin ykkösportin johdin kytkentäverkon AE-porttiin ja kakkosportin johdin RF-porttiin. EUT-portti tulee päättää 150  $\Omega$ :iin, joka tehdään 100  $\Omega$ :n vastusadapterilla, johon on lisätty 50  $\Omega$ :n pääte. Matalilla taajuuksilla läpimenovaimennus on suurempi, kun taas korkeammilla taajuuksilla läpimenovaimennus pienenee.

Kuvassa 17 näkyy horisontaaliakselilla läpimenovaimennus 10 dB:n välein. Vertikaaliakselilla näkyy taajuusalue 150 kHz – 230 MHz.



KUVA 17. KytKentäverkon S1 läpimenovaimennusarvot

#### 7.2.4 Tulosten vertailu standardeihin ja kalibroitiraportteihin

IEC/EN 61000-4-6 -standardin mukaan kytKentäverkon impedanssiarvojen tulee olla taulukossa 1 mainittujen arvojen sisällä. Piirianalyysaattorimittauksien avulla nähdään, että kytKentäverkon S1 impedanssiarvot ovat siis standardin mukaiset. Suurin notkahdus nähdään korkeammilla taajuuksilla, mutta tulos täyttää silti reilusti vaaditut arvot.

Häiriövaimennukselle ja läpimenovaimennukselle IEC/EN 61000-4-6 -standardi ei esitä vaadittuja arvoja. Nämä arvot laitevalmistaja itse määrittää. Kyseisen kytKentäverkon S1 laitevalmistaja ilmoittaa häiriövaimennuksen olevan koko taajuusalueella  $10 \text{ dB} \pm 1 \text{ dB}$ . Kuvasta 16 voidaan siis nähdä häiriövaimennuksen olevan sallituissa rajoissa lähes koko taajuusalueen. Ainoa pieni poikkeus on aivan taajuusalueen lopussa, jolloin häiriövaimennus ylittää hieman ilmoitetun rajan. Tämä johtune siitä, että testausasetelma on hieman erilainen kuin virallisissa kalibroinneissa. Laitevalmistaja ilmoittaa läpimenovaimennuksen olevan taajuusalueella 150 kHz – 80 MHz yli 55 dB ja taajuusalueella 80 MHz – 230 MHz yli 35 dB. Kuvasta 17 nähdään, että nämä kriteerit täyttyvät.

Verrattuna edellisvuosien kalibroitiraportteihin kyseisen S1-kytKentäverkon mitatut arvot vastaavat hyvin paljon toisiaan. Mittauksia voidaan siis pitää luotettavina, kun mitataan rakennettua kytKentäverkkoa M1.

## 8 ENSIMMÄINEN PROTOTYYPPI

Ensimmäisen kytkentäverkon prototyyppi oli rakennettava tarkasti standardien mukaisesti. Tällä tavalla varmistuttiin siitä, että mittaustulokset ovat suoraan verrattavissa standardien arvoihin.

### 8.1 Perehtyminen kytkentäverkkoon M1

Ensimmäisen prototyypin rakentaminen alkoi tutustumalla ferriitteihin. Ferriittien avulla saadaan estettyä kytkentäverkossa kulkeva häiriösignaali kulkeutumasta mittauksessa käytettäviin apulaitteistoihin. EMC-laboratoriolla oli hyllyssä valmiina ferriittejä, joiden avulla päästiin tutustumaan siihen, kuinka signaalinkulku vaimentuu lisättäessä signaalijohtimen kierroslukumääriä ferriittien ympärille. Jokainen kierros lisää vaimennusta matalilla taajuuksilla, mutta heikentää vaimennusta mentäessä korkeimmille taajuuksille. Mittaukset tehtiin piirianalysaattorilla.

Varsinaiseen kytkentäverkkoon tilattiin hieman erilaisia ferriittejä. Laboratoriolla olleet 4W620-materiaaliset ferriitit korvattiin 4C65-materiaalisilla ferriiteillä. Tämä johtui siitä, että CISPR 16-1-2 kehottaa käyttämään kyseistä materiaalia.

### 8.2 Kotelointi

Ensimmäisen prototyypin kotelo päätettiin rakentaa itse. Kotelon mitat tehtiin vastaamaan tehdasvalmisteista kytkentäverkkoa S1. Kotelon mitat olivat 100 x 100 x 185 mm. Koteloon käytettiin 1,5 mm:n paksuista alumiinilevyä. Levy mitoitettiin siten, että sitä taittelemalla saatiin halutun kokoiset sivut ja taitokset. Taitokset alumiinilevyyn tehtiin levytyökoneen avulla. Kotelon toinen pääty valmistettiin alumiinilevystä, mutta toinen pääty valmistettiin ei-johtavasta materiaalista. Materiaalina käytettiin MDF-levyä. Päädyt kiinnitettiin runkoon ruuveilla. Kotelon pohjan tuli olla mahdollisimman tasainen, jotta se saisi kontaktin maadoituslevyyn koko pinta-alaltaan.

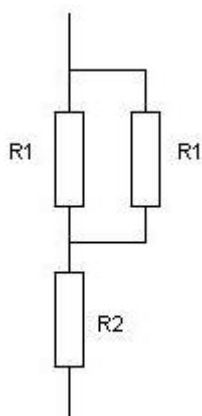
Ferriittien sisälle tehtiin 19 mm:n paksuinen tukipuu, joka pitää ferriitit paikoillaan oikealla korkeudella ja tukee käämilangan ferriitin sisäpuolen pintaa vasten. EUT:n puolelle tulleesta ei-johtavasta materiaalista rakennettiin myös tukilevy ferriittien tukipuulle. Tukipuu ruuvattiin AE:n puoleisen päädyn ja tukilevyn väliin. Tämän jälkeen ferriittien pinnalla oleva käämilanka vielä puristettiin napakasti kiinni ferriittiin, jotta

kontakti olisi mahdollisimman hyvä ja käämilangan ylimääräinen liikkuvuus eliminoidaisiin.

### 8.2.1 Vastusten lisääminen kotelon sisälle

Kytkentäverkon yhteismuotoiseen impedanssiin vaikuttava vastusverkko rakennettiin EUT:n puolelle. Vastusverkon täytyi olla arvoltaan noin 100  $\Omega$ . Vastusverkolta vaaditaan hyvää tehonsietokykyä. Tämän vuoksi valittiin vastukset, joiden tehonsieto on kaksi wattia. Tehonsietoa saatiin parannettua myös laittamalla kaksi 220  $\Omega$ :n vastusta rinnan, koska signaali kulkee nyt yhden vastuksen sijasta kahden vastuksen läpi. Vastusverkkoon lisättiin vielä sarjaan yksi 10  $\Omega$ :n vastus, joten vastusarvoksi saatiin kokonaisuudessaan 120  $\Omega$  kaavan 8.1 mukaisesti. Vastusverkko juotettiin BNC-liittimen ja EUT-puolen banaaniliittimen välille.

$$R = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} \right)^{-1} + R_2 \quad (8.1)$$



KUVA 18. Vastusverkko

### 8.2.2 Liittimien ja johtimien paikat

Sijoiteltaessa liittimiä koteloon oli huomioitava, että standardin mukaan kaikki signaalin kulkuun liittyvät liitinpaikat tulee olla 30 mm korkeudella maadoituslevystä. Tämän vuoksi myös signaalilinja ferriittien ympärillä tuli olla samalla korkeudella. Tämä mahdollistaa sen, että siirtojohtimen impedanssiksi voidaan saada vaadittu 150  $\Omega$ . Signaalihohtimen päät juotettiin kiinni EUT- ja AE-puolen banaaniliittimiin. Ennen juottamista täytyi käämilangan päistä hioa varsinainen johdinosi esille ohuen eristysmateriaalin alta.



### 8.2.3 Maadoitus

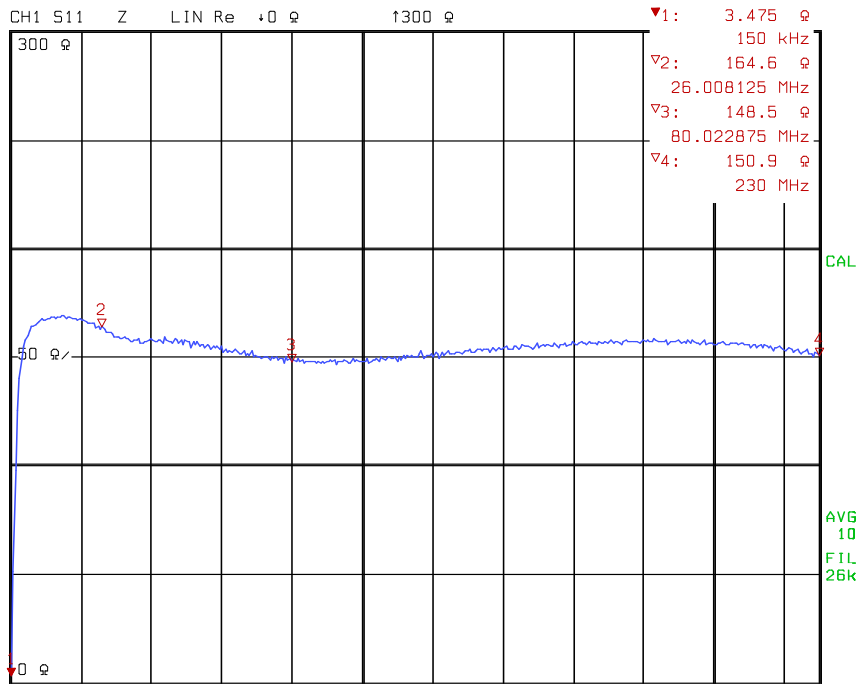
Myös maadoitus on otettava huomioon, koska kotelo ei ole täysin yhtenäinen vaan AE-puolen päätylevy on ruuvattu kiinni. Vaikka AE-puoleinen alumiinipääty on kontaktissa rungon alumiiniin, varmistetaan maadoitusjohtimella mittaustulosten toistettavuus, koska mekaaninen rasitus ja alumiinikotelon eri kosketuspintojen liikkuminen voi näkyä tuloksissa. Näin ollen BNC-liittimen rungosta ja AE-puolen banaaniliittimestä on rakennettu maadoitusreitti maadoitusliittimeen. Maadoituksessa oli huomioitava myös, että käytettävä BNC-liitin ei yhdisty suoraan kotelon runkoon saaden kontaktia, vaan välissä on käytetty muovia. Näin ollen BNC-liittimen maadoitusosasta rakennettiin maadoitusreitti maadoitusliittimeen.

Kytkentäverkon M1 prototyyppi sisältäpäin on nähtävissä kuvassa 26 (liite 1). Kuvissa 27 ja 28 (liite 2) on kytkentäverkon prototyyppi kuvattuna EUT- puolelta ja AE- puolelta.

## 8.3 Kytkentäverkon M1 prototyyppin mittaukset

### 8.3.1 Impedanssin mittaus

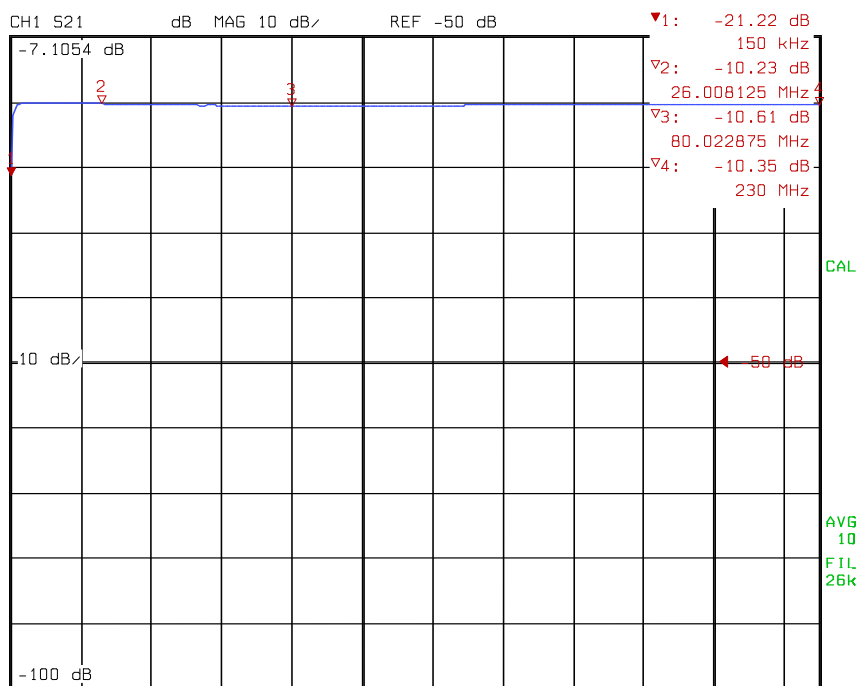
Kytkentäverkon M1 prototyyppin impedanssimittauksien tulokset näkyvät kuvassa 19. Kuvasta on nähtävissä, että matalilla taajuuksilla impedanssiarvot eivät ole vaadituissa rajoissa vaan paljon alempana. Mentäessä korkeammille taajuuksille impedanssiarvot ovat vaadittujen rajojen sisällä. Tästä voidaan päätellä, että kytkentäverkossa käytetyt ferriitit eivät riitä kattamaan koko taajuusaluetta. Taajuusalueella 150 kHz – 1,3 MHz impedanssiarvojen on noustava vähintään vaadittuun 130  $\Omega$ :iin.



KUVA 19. KytKentäverkon M1 prototyypin impedanssiarvot

### 8.3.2 Häiriövaimennus

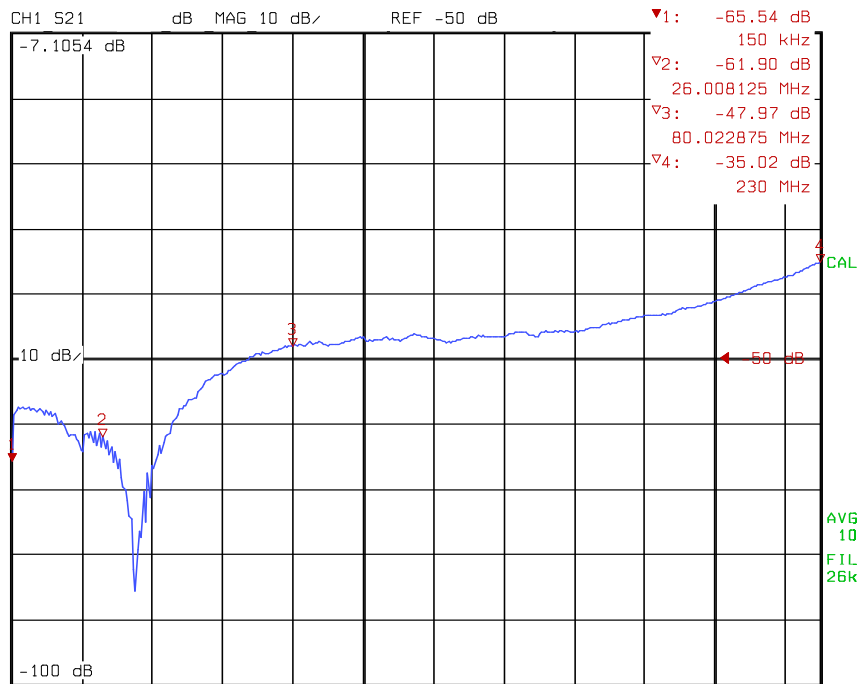
Impedanssiarvojen vaikuttaessa häiriövaimennukseen voidaan kuvasta 20 todeta, että myös läpimеноvaimennusarvo on liian alhainen matalilla taajuuksilla. Noin 1,3 MHz:n jälkeen läpimеноvaimennus on sallituissa rajoissa.



KUVA 20. KytKentäverkon M1 prototyypin häiriövaimennusarvot

### 8.3.3 Läpimenovaimennus

Kuvasta 21 nähdään prototyypin läpimenovaimennus. Kuvasta voidaan nähdä, että läpimenovaimennus on sallituissa rajoissa koko taajuusalueella. Taajuusalueen lopussa läpimenovaimennus on kuitenkin lähellä alarajaa, joten tähänkin olisi saatava vaimennusta hiukan lisää.



KUVA 21. Kyt Kentäverkon M1 prototyypin läpimenovaimennusarvot

### 8.3.4 Tulosten vertailu standardeihin ja kalibrointiraportteihin

Kaikissa mittauksissa todettiin mittaustulosten olevan vaadittujen arvojen alle tai hyvin lähellä niitä. Koska IEC/EN 61000-4-6 -standardi ei ole asettanut arvoja häiriövaimennukselle ja läpimenovaimennukselle, verrataan arvoja tehdasvalmisteisen kyt Kentäverkon S1 valmistajan antamiin rajoihin.

## 9 PROTOTYYPISÄ ILMENNEET ONGELMAT JA NIIDEN RATKAISUT

Prototyypin virheellisiin arvoihin voi vaikuttaa monet tekijät. Ensimmäiseksi tarkastettiin signaalitiet yleismittarilla ja huomattiin, että signaalitiet olivat ainakin vastusarvojen mukaan oikeat. Vaikka vastusarvot olivat oikeat, voi liittimien ja juotoksien välissä silti olla ongelmia signaalinkulussa. Esimerkkinä virheellisistä juotoksista on ns. kylmäjuotos. Oikeaoppisessa juotoksessa kaikki siihen kuuluvat osat lämmitetään ja tinalanka sulaa lämmityksen avulla haluttuun kohtaan. Jos virheellisesti vain sulattaa tinalangan kolvin päähän, voi juoksuteaine palaa pois ja näin juotos ei ole kestävä tai se ei jopa johda sähköä ollenkaan. Prototyypin juotokset tehtiin varmuuden vuoksi uudestaan, jotta kylmäjuotoksen kaltaiset ongelmat poistuisivat varmuudella. Samassa yhteydessä käämilankaa hieman lyhennettiin, koska ylimääräisen johdinpituuden luultiin myös vaikuttavan arvoihin, mutta tässä tapauksessa todettiin, ettei johtimen lyhentämisellä ollut vaikutusta.

Seuraavaksi tarkastettiin maadoituksen mahdolliset puutteet. Maadoitus todettiin riittäväksi, koska käämilanka ja RF-portin BNC-liitin olivat yhteydessä maadoitusjohdolla koteloon. BNC-liitintä tarkastettaessa huomattiin, että käytetty liitin ei ollut suorassa yhteydessä koteloon, joten liitinmalli päätettiin vaihtaa suoraan kotelossa kiinni olevaksi. Tällä tavoin liitin maadoittuu koteloon eikä jää kelluvaksi.

Mitkään edellä mainitut muutokset eivät vaikuttaneet mittaustuloksiin. Tästä pääteltiin, että kytkentäverkkoon oli lisättävä ferriittejä, vaikka ne vaikuttaisivat taajuusalueen loppupään impedanssiin. Lisäämällä ferriittejä ja käämilangan kierroslukumääriä saatiin impedanssia ja häiriövaimennusta parannettua matalille taajuuksille. Vaadittujen arvojen rajoihin päästiin, kun kytkentäverkkoon lisättiin kaksi ferriittirengasta ja niiden ympärille 13 kierrosta käämilankaa. Korkeammilla taajuuksilla impedanssiarvot vaihtuivat, mutta säilyivät sallituissa rajoissa.

## 10 LOPULLISEN KYTKENTÄVERKON M1 RAKENNUS

Lopullinen kytkentäverkko M1 rakennettiin valmiin kytkentäverkon S1 ja M1 prototyypin rakenteiden mukaan. Lisäksi apuna käytettiin prototyypissä ilmeiden ongelmien ratkaisuja.

### 10.1 Valitut komponentit

Lopullisessa kytkentäverkossa käytettiin suurilta osin samoja komponentteja kuin prototyypissä. Vaihdetut osat olivat RF-portin BNC-liitin ja lyhyemmät banaani liittimet. Lisäksi ferriittiketjuun lisättiin kaksi ferriittirengasta.

### 10.2 Kotelointi

Koteloksi valittiin Eddystonen valmis alumiinikotelo (kuva 22), johon tehtiin muutamia fyysisiä muutoksia. Kotelon toinen pääty poistettiin, koska EUT-puolen tuli olla ei-johtavaa materiaalia. Tämän tilalle liimattiin muovilevy. Samasta muovilevystä saatiin myös kytkentäverkon sisälle tehtyä tuki, johon ferriittien sisällä oleva tukipuu kiinnitettiin. Lisäksi kotelon päälle porattiin reikä RF-porttia varten.



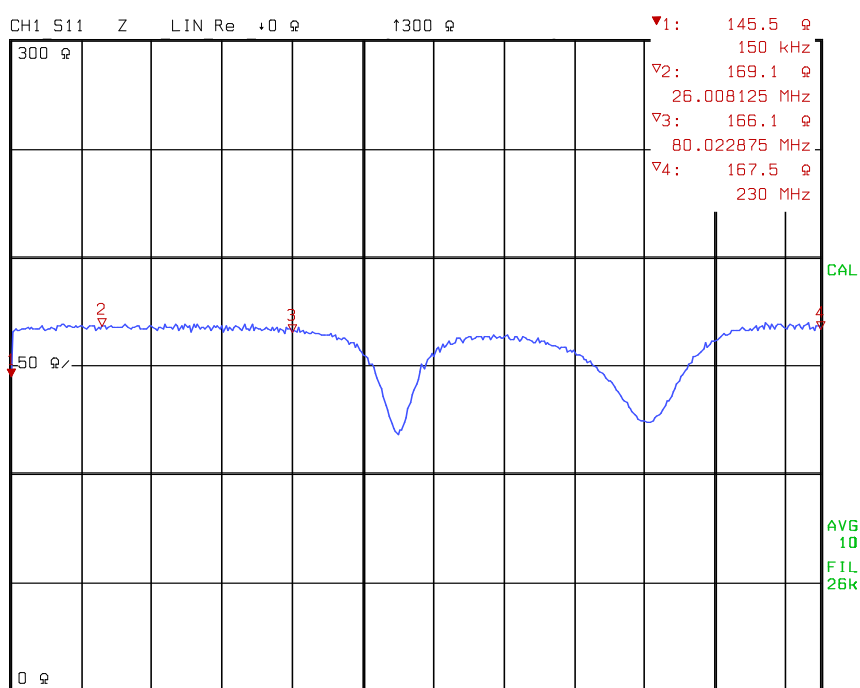
KUVA 22. Eddystonen alumiinikotelo (Vekoy)

Kuvassa 29 on lopullinen kytkentäverkko M1 sisältäpäin kuvattuna. Kuvissa 30 ja 31 on lopullinen kytkentäverkko kuvattuna EUT-puolelta ja AE-puolelta.

### 10.3 KytKentäverkon M1 mittaukset

#### 10.3.1 Impedanssin mittausta

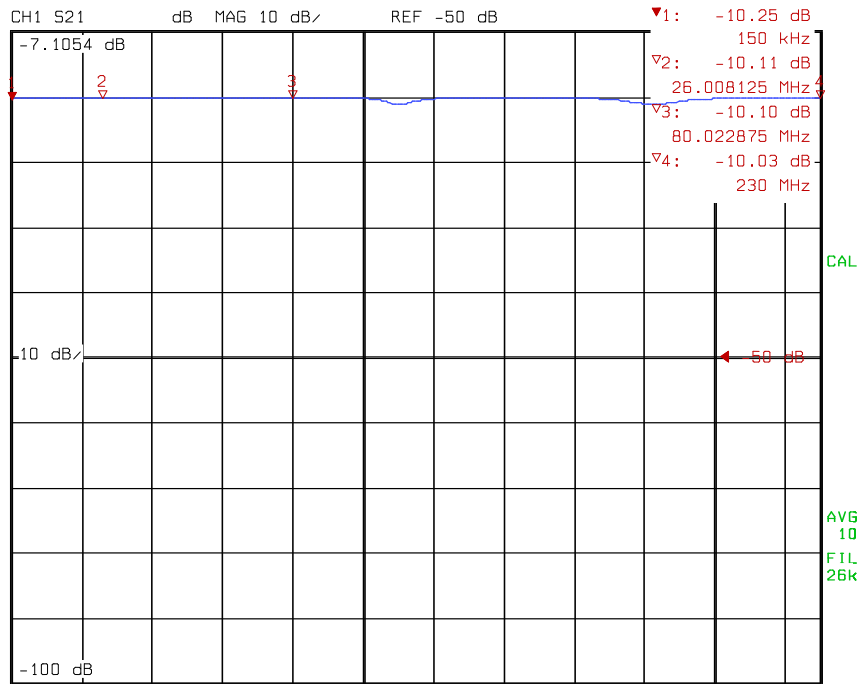
Lopulliseen kytKentäverkkoon M1 tehtyjen muutosten jälkeen impedanssiarvot nousivat matalilla taajuuksilla riittävälle tasolle vaikuttamatta liikaa korkeilla taajuuksilla. Impedanssiarvoissa on kaksi pientä notkahdusta noin 110 MHz:n ja 180 MHz:n kohdalla, mutta vaadituissa raja-arvoissa pysytään reilusti. Kuvassa 23 näkyy piirianalysaattorilta saadut arvot.



KUVA 23. KytKentäverkon M1 impedanssiarvot

#### 10.3.2 Häiriövaimennus

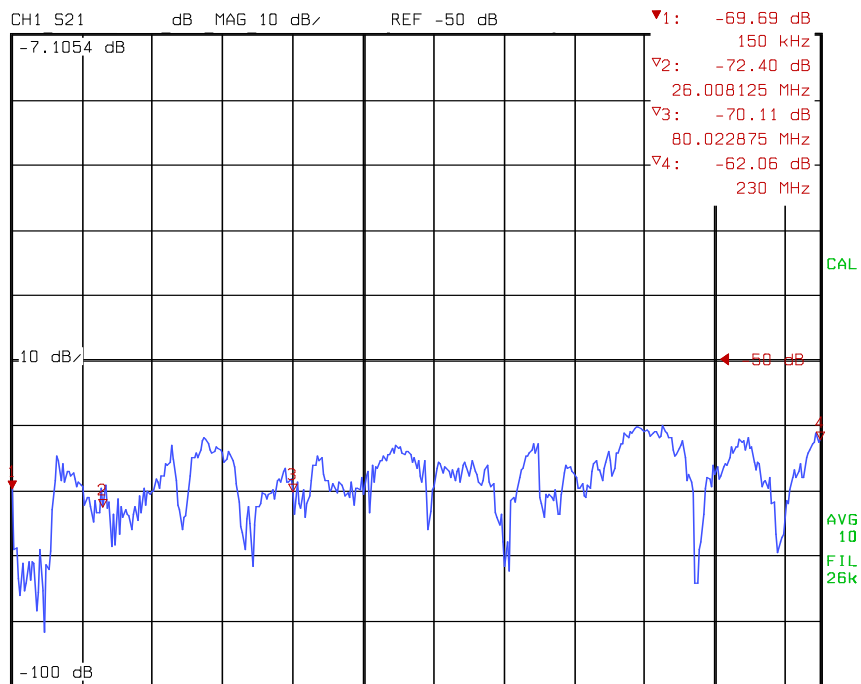
Häiriövaimennus nousee matalilla taajuuksilla impedanssimuutoksen yhteydessä. Myös häiriövaimennuksessa on nähtävissä hyvin pienet notkahdukset samoissa taajuuksipisteissä kuin impedanssimittauksissa. Nämä notkahdukset pysyvät myös sallituissa rajoissa. Kuvassa 24 näkyy piirianalysaattorilta saadut arvot.



KUVA 24. KytKentäverkon M1 häiriövaimennusarvot

### 10.3.3 Lämpimovaimennus

Myös lämpimovaimennus parantui huomattavasti. Prototyypissä lähellä rajaa olleet korkeataajuiset kohdat ovat poistuneet ja vaimennus pysyy yli 60 dB koko taajuusalueella.



KUVA 25. KytKentäverkon M1 lämpimovaimennusarvot

## 11 YHTEENVETO JA KEHITTÄMISEHDOTUKSET

Lopputuloksena saatiin toimiva ja standardit täyttävä kytkentäverkko M1. Kytkenäverkkoa voidaan käyttää 150  $\Omega$ :n päätteellä, häiriösignaalin syöttämiseen sekä häiriösignaalin erottimena apulaitteistolle. Kytkenäverkolle tehtiin vaatimustenmukaisuuden varmistamiseksi kalibroitimittaukset, joista tehtiin virallinen kalibroitiraportti (liite 3).

Opinnäytetyössä joutui paneutumaan ja tutustumaan kaikkiin erityyppisiin kytkentäverkkoihin, mikä antoi laajalti tietoa johtuvan häiriön siedon mittauksiin. Tulevaisuudessa tullaan rakentamaan lisää kytkentäverkoja eri kytkennöille. Tämä vaatii joidenkin kytkentäverkkotyyppien suunnittelussa hieman lisää perehtymistä RF-tekniikan asioihin, jotta eri komponenttien vuorovaikutukset ymmärretään täysin.

Laboratoriolla käytössä olevan piirianalysoittorin avulla EMC-testilaitteiden kalibroitnit pystytään tekemään Savonian EMC-laboratoriolla. Piirianalysoittorin yksityiskohdaisen tutustumisen myötä testilaitteet voitaisiin kalibroida vertaamalla tuloksia laitetietoihin.



## LÄHTEET

Agilent technologies, Inc. 2005. *Back to basics* [PDF-dokumentti]. Agilent Technologies [viitattu 5.7.2011]. Saatavissa:

[http://www.home.agilent.com/upload/cmc\\_upload/All/BTB\\_Network\\_2005-1.pdf](http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/BTB_Network_2005-1.pdf)

Armstrong, K. *Testing and measurements techniques – Immunity to conducted disturbances induced by radio-frequency fields* [PDF-dokumentti]. REO [viitattu 19.7.2011]. Saatavissa:

[http://www.reo.co.uk/files/handbook\\_en61000-4-6\\_v2.pdf](http://www.reo.co.uk/files/handbook_en61000-4-6_v2.pdf)

*Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/108/EY* [PDF-dokumentti]. Euroopan unionin virallinen lehti [viitattu 6.9.2011]. Saatavissa:

<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:390:0024:0037:fi:PDF>

Ferroxcube. *Ferrite toroids data sheets* [PDF-dokumentti]. Elfa [viitattu 16.6.2011]. Saatavissa:

<https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/05875893.pdf>

*IEC/EN 61000-4-6 2008. Testing and measurements techniques – Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields.* Edition 3.0. International electrotechnical commission.

Lehto, A. & Räisänen, A. 2007. *Mikroaaltomittaustekniikka*. Helsinki: Otatie Oy.

Ludwig, R. & Bretchko P. 2000. *RF circuit design – Theory and applications*. New Jersey: Prentice Hall.

Marshall, R. & Williams, T. *Pitfalls and practice of IEC 61000-4-6 conducted immunity testing* [PDF-dokumentti]. Elmac services [viitattu 14.7.2011]. Saatavissa:

[http://www.elmac.co.uk/pdfs/PNP\\_61000-4-6.pdf](http://www.elmac.co.uk/pdfs/PNP_61000-4-6.pdf)

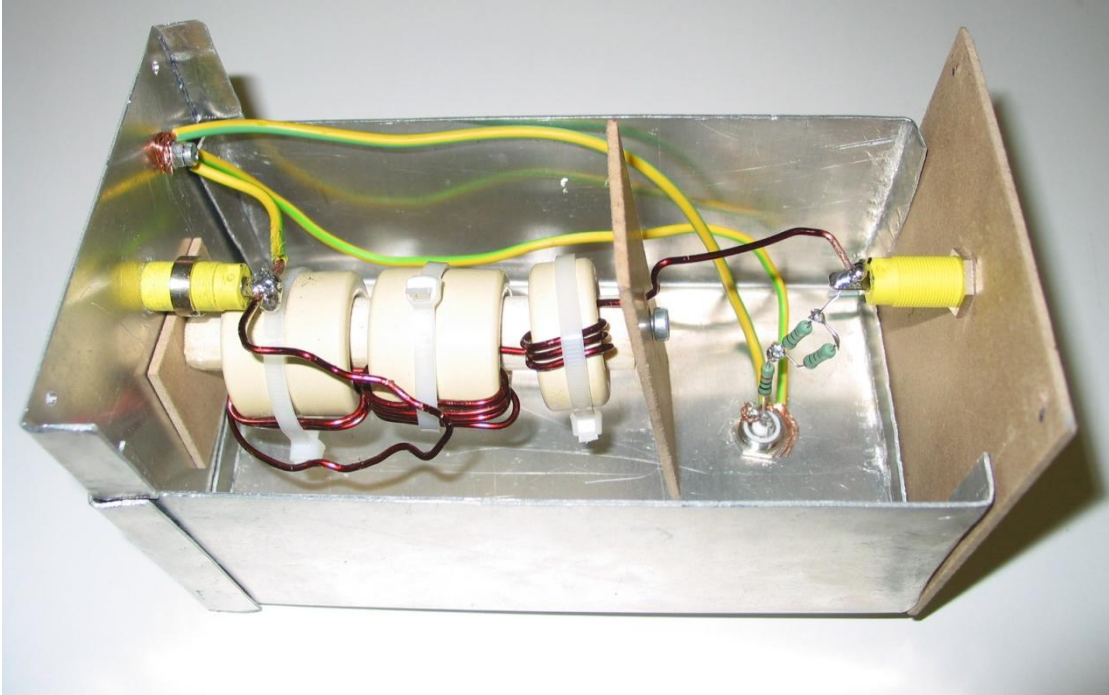
Reitmaa, I. & Gustafsson, J. 1996. *Varma digitaalielektroniikka – EMC-, vianehkäisy ja häiriötorjuntatekniikkaa*. Helsinki: Otatieta Oy.

Silvonen, K. 2009. *Piirianalysaattori, kalibrointi ja sirontaparametrit* [PDF-dokumentti]. [viitattu 20.6.2011]. Saatavissa: <http://users.tkk.fi/ksilvone/piirianalysaattori.pdf>

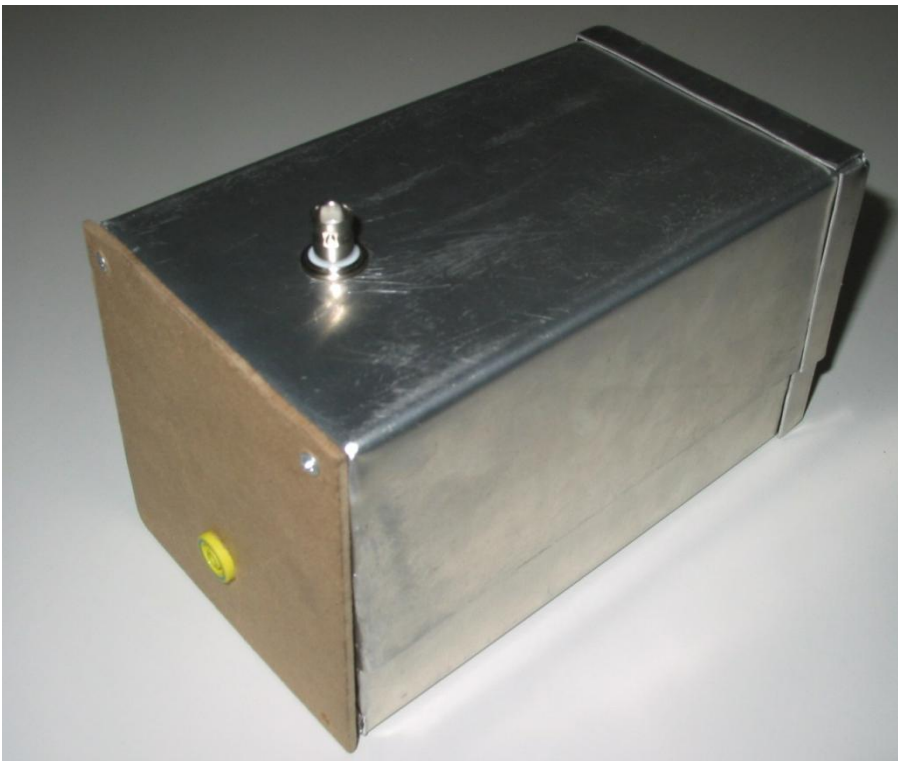
Tukes. 2011. *Paloilmoittimien ja sammutuslaitteistojen vaatimustenmu-  
kaisuus* [verkkojulkaisu]. Tukes [viitattu: 13.7.2011] Saatavissa: [http://www.tukes.fi/Tiedostot/sahko\\_hissit/kuvat/ce.gif](http://www.tukes.fi/Tiedostot/sahko_hissit/kuvat/ce.gif)

Vekoy. *Eddystone alumiinikotelo* [Verkkojulkaisu]. Vaasan elektroniikka-  
keskus Oy [viitattu 14.7.2011]. Saatavissa: [http://www.vekoy.com/product\\_info.php?cPath=81\\_862\\_863&products\\_id=10191](http://www.vekoy.com/product_info.php?cPath=81_862_863&products_id=10191)

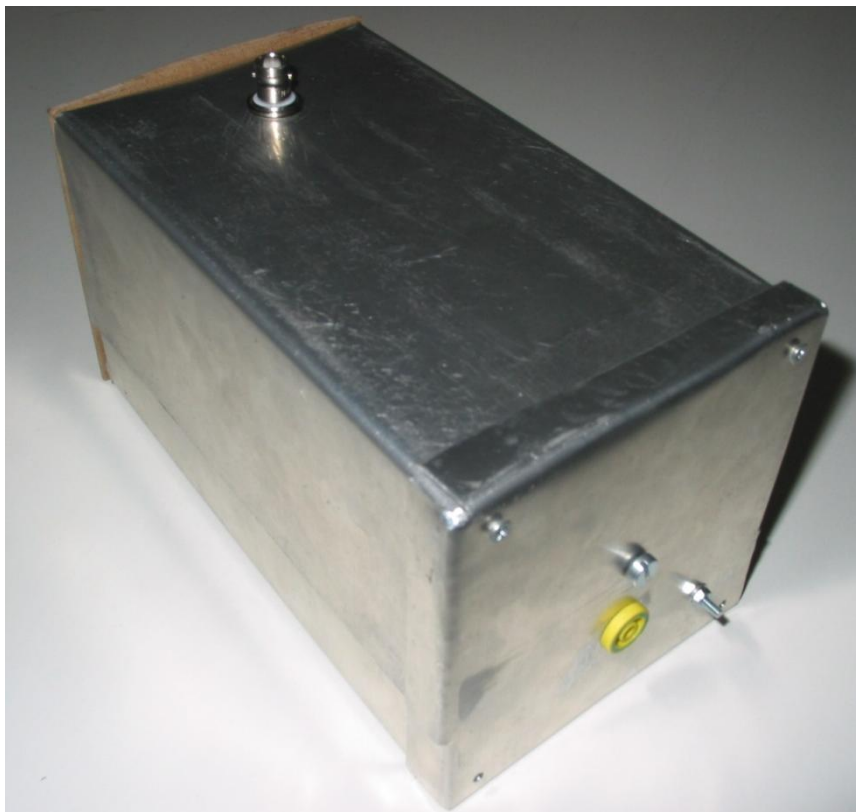
Williams, T. 2001. *EMC for product designers*. Oxford: Newnes.

**KytKentäverkon M1 prototyyppi**

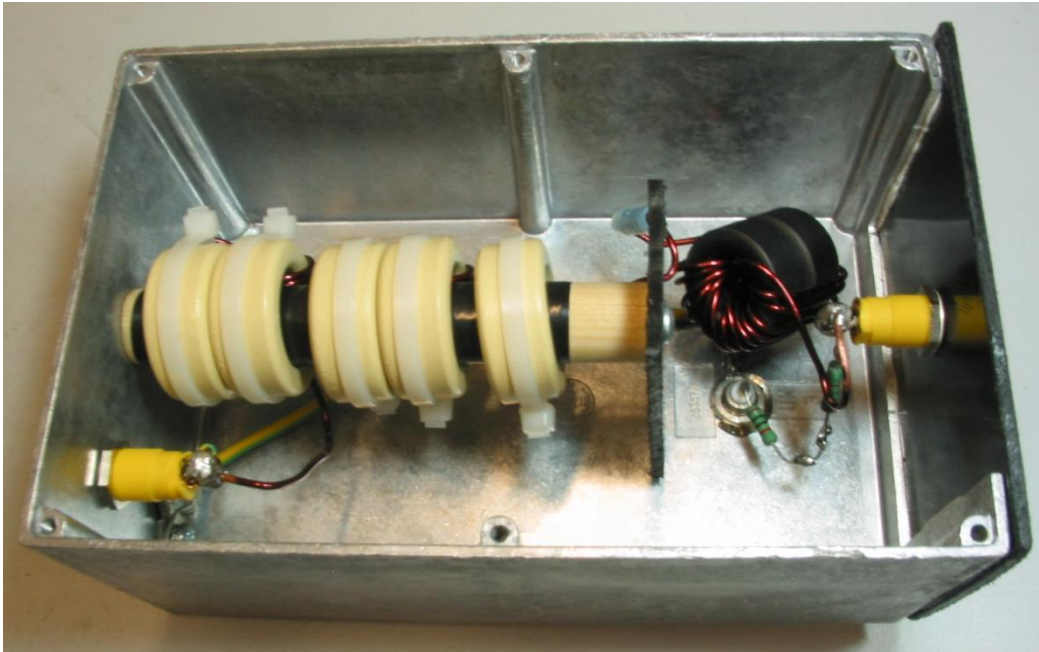
KUVA 26. KytKentäverkon M1 prototyypin sisäosa



KUVA 27. KytKentäverkon M1 prototyypin EUT-puoli sekä RF-portti



KUVA 28. Kytentäverkon M1 prototyypin AE-puoli

**Lopullinen kytkentäverkko M1**

KUVA 29. Lopullinen kytkentäverkko M1 kuvattuna sisältä



KUVA 30. Lopullinen kytkentäverkko M1 kuvattuna RF-portin ja EUT-portin puolelta



KUVA 31. Lopullinen kytkentäverkko M1 kuvattuna AE-puolelta

## Calibration Report

Date 8.9.2011

---

**Document number:**      0031030309A

**Name of the site:**      Savonia University of Applied Sciences, EMC – laboratory,  
Technopolis, Kuopio

**Address:**      Microkatu 1 C  
P.O.Box 6  
FI-70201 KUOPIO

**Client:**      Savonia University of Applied Sciences

**Performed calibrations:**      Auxiliary equipment calibrations of conducted immunity

<b>Tested and reported by:</b>	_____ Jarmo Kauppinen Project worker	Checked by:	_____ Tero Sipari Test engineer
--------------------------------	--	-------------	---------------------------------------

These test results are valid for the tested unit only. This report shall not be reproduced, except in full, without a written permission of Savonia University of Applied Sciences, Engineering Kuopio / EMC-laboratory

---

**Table of contents:**

<b><u>1. Date and place of measurements</u></b>	3
<b><u>2. Instrument Details</u></b>	3
<b><u>3. Particulars of calibration</u></b>	3
<b><u>3.1 Environmental conditions</u></b>	3
<b><u>3.2 Test equipments used in the calibration</u></b>	5
<b><u>3.3 Calibration procedure</u></b>	5
<b><u>4. Measurements results</u></b>	5
<b><u>4.1 Impedance (AE Open)</u></b>	6
<b><u>4.2 Insertion Loss</u></b>	7
<b><u>5. Literature</u></b>	8



## 1. Date and place of measurements

The measurements were carried out:

- By: Jarmo Kauppinen
- Date: 6. of September 2011
- At: Savonia University of Applied Sciences  
Microkatu 1 C  
P.O.Box 6  
FI-70201 KUOPIO  
FINLAND

## 2. Instrument Details

- Description: M1 Coupling / Decoupling Network CDN
- Serial Number: 0002
- ID Number: None

Equipment to be calibrated is a Coupling / Decoupling Network for EMC measurements according to standard IEC 61000-4-6:2008-10, Edition 3.0.

## 3. Particulars of calibration

### 3.1 Environmental conditions

Ambient temperature: 23,8 °C

Relative humidity: 39,2 %



### 3.2 Test equipments used in the calibration

- Rohde & Schwarz Network Analyzer ZVRE
- Rohde & Schwarz 100 ohm resistor

Scope of calibration: Impedance (reflection coefficient), attenuation.

### 3.3 Calibration procedure

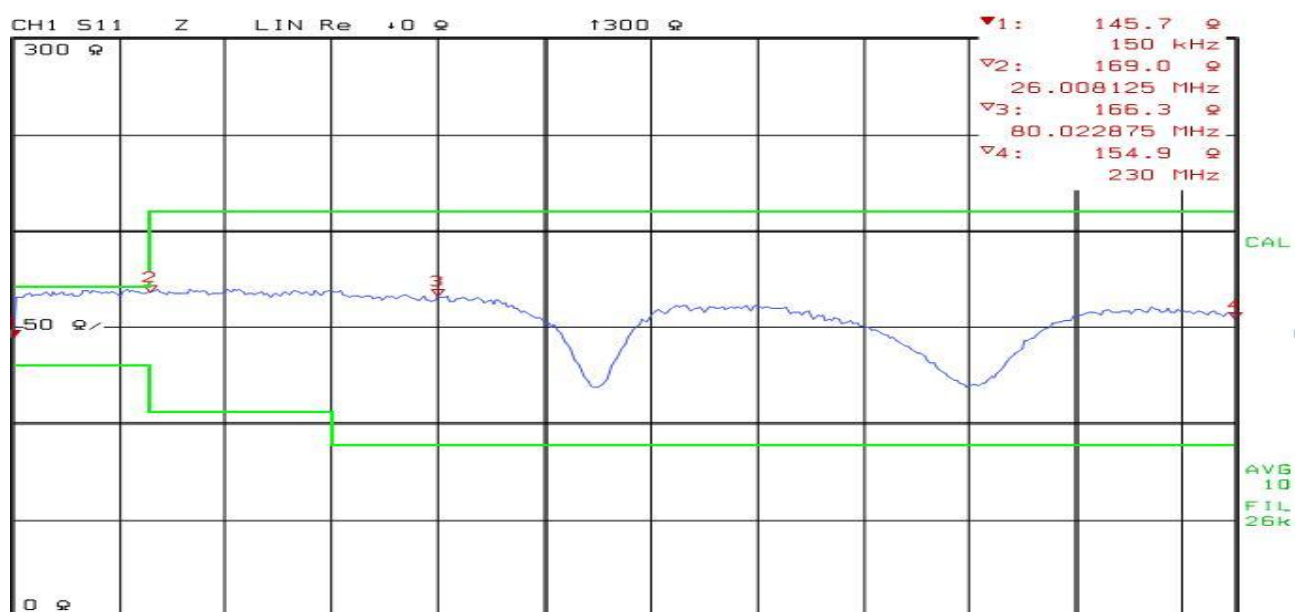
Measurements were done with a Rohde & Schwarz Network Analyzer ZVRE. Coaxial cables were used between the network analyzer and DUT (CDN M1). The cables calibrations were performed by Rohde & Schwarz Calibration kit N50  $\Omega$  ZV-Z21.

## 4. Measurements results

The Coupling / Decoupling Network CDN M1 was calibrated and found to comply with the manufacturer's specification at the measured points.

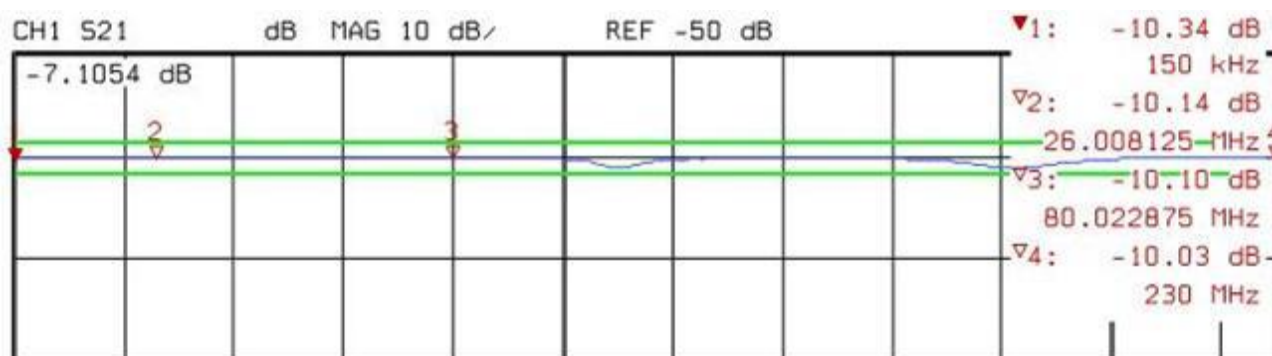
## 4.1 Impedance (AE Open)

Frequency (MHz)	Lower Limit ( $\Omega$ )	Result measured ( $\Omega$ )	Upper limit ( $\Omega$ )
0,15	130	146.4	170
0,8	130	166.6	170
1	130	166.7	170
2	130	167.2	170
5	130	168.9	170
8	130	168.8	170
10	130	168.7	170
20	130	168.4	170
26	130	169.8	170
40	105	169.6	210
50	105	167.7	210
60	105	169.3	210
70	105	168.9	210
80	105	168.2	210
90	90	164.6	210
100	90	154.2	210
110	90	121.3	210
120	90	158.2	210
140	90	162.8	210
160	90	151.1	210
180	90	121.1	210
200	90	156.3	210
210	90	158.3	210
220	90	159.8	210
230	90	156.1	210



## 4.2 Insertion Loss

Frequency (MHz)	Lower Limit (dB)	Result measured (dB)	Upper limit (dB)
0,15	typ 9 dB	10,35	typ 11 dB
0,8	typ 9 dB	10,16	typ 11 dB
1	typ 9 dB	10,23	typ 11 dB
2	typ 9 dB	10,18	typ 11 dB
5	typ 9 dB	10,19	typ 11 dB
8	typ 9 dB	10,19	typ 11 dB
10	typ 9 dB	10,15	typ 11 dB
20	typ 9 dB	10,15	typ 11 dB
26	typ 9 dB	10,16	typ 11 dB
40	typ 9 dB	10,18	typ 11 dB
50	typ 9 dB	10,14	typ 11 dB
60	typ 9 dB	10,14	typ 11 dB
70	typ 9 dB	10,13	typ 11 dB
80	typ 9 dB	10,15	typ 11 dB
90		10,14	
100		10,27	
110		11,20	
120		10,35	
140		10,19	
160		10,21	
180		11,13	
200		10,32	
210		10,20	
220		10,12	
230		10,04	



## 5. Literature

- [1] IEC 61000-4-6 Edition 3.0 2008 - 10: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-6: Testing and measurement techniques – Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields.







---

[www.savonia.fi](http://www.savonia.fi)

